

# **ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В РОТОРНО-ПЛЕНОЧНОМ АППАРАТЕ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В КОНЦЕНТРИРОВАНИИ ВЫСОКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

А.В. Ряпосов, А.П. Хомяков

*ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург*

## **Гидродинамика**

В настоящее время в химической промышленности находят все более широкое применение пленочные роторные аппараты. Они применяются при проведении самых разнообразных технологических процессов экстракции, выпаривания, сушки, концентрирования, дистилляции и т.д.

На гидродинамическую характеристику пленки существенно влияет наличие в аппарате вращающегося ротора.

Определение толщины пленки в пленочном роторном аппарате с шарнирными лопатками в результате наличия разнородных областей течения очень затруднительно. Поэтому определение её идёт косвенным путем как средняя величина, рассчитанная по скорости, по расходу, по теплопередаче и т.д.

В настоящее время существует большое количество работ, посвященных исследованию гидродинамики пленочных аппаратов. Часть исследователей считает, что толщина пленки в аппарате всегда меньше зазора между жесткой лопаткой ротора и греющей поверхностью. При этом при вращении ротора лопатка не касается жидкости, а воздействует на нее через воздушный слой, создавая вентиляционный эффект, поэтому движение жидкости приближается к движению свободно падающей пленки. Роль ротора сводится к поддержке тонкого слоя жидкости на греющей поверхности. Результаты получены Ухинди и Бабос, Ленигер и Велдстра.

Рассматривая пленку жидкости как свободно стекающую, они получили следующие данные:

$Re < 24$  – пленка гладкая;

$Re > 24$  – на пленке возникают волны;

$Re \sim 1000$  – равномерное распространение волн;

$Re > 1600$  – турбулентный режим.

О независимости времени пребывания жидкости в пленочном роторном аппарате от окружной скорости пришёл к выводу в своей работе Лысенко. Он предположил, что с увеличением окружной скорости ротора наряду с увеличением скорости жидкости увеличивается длина пути.

Для того, чтобы осуществить равномерное распределение пленки на греющей поверхности аппарата за счёт вентиляционного эффекта, для пленочных роторных аппаратов с жёсткими лопатками рекомендуется окружная скорость порядка 8-11 м/с, в то время как для пленочных роторных аппаратов с шарнирными лопатками порядка 2-3 м/с.

Однако все исследователи, которые проводили эксперименты на роторных пленочных аппаратах с шарнирными лопатками, отмечают следующие качественные стороны этих аппаратов:

Улучшение процесса теплопередачи.

Малые окружные скорости, необходимые для турбулизации пленки.

Возможность переработки вязких продуктов.

Возможность получения сухого продукта.

Таким образом, на основании литературного материала видно, что единого мнения о характере течения пленки в роторном аппарате нет, хотя для роторных аппаратов с жесткими лопатками большинство исследователей пришли к мнению, что толщина пленки в этих аппаратах определяется с основным плотностью орошения, вязкостью продукта, числом оборотов ротора, количеством лопаток и величиной зазора между кромкой лопатки и греющей поверхностью аппарата.

### **Расход энергии**

Кодау предлагает следующую гидродинамическую модель жидкости. Каждый элемент жидкости движется вертикально сверху вниз и одновременно вращается. При высоких вязкостях преобладает вращательное движение, а при

низких – вертикальное. Перед лопатками возникают носовые волны, а за ними образуется турбулентный след, а дальше, так называемая, спокойная зона, где жидкостная пленка прилипает к стенке и течёт вертикально под действием сил тяжести.

Используя гидродинамическую модель Кодау и применяя полуэмпирическую теорию турбулентного перекося и уравнения для диссипации энергии, Доманский и Соколов получили уравнение для определения расхода мощности, которое они аппроксимировали степенными зависимостями с точностью  $\pm 25\%$

$$\frac{N}{\rho \omega^3 R^4 l} = 1,5 Re_{nl}^{0,56} \cdot Re_{\eta}^{-1} \cdot Re_{\eta}^{0,35} \cdot Fr_{\eta}^{0,35} \cdot \left(\frac{\Delta}{R}\right)^{-0,3} \cdot Z^{0,3}$$

Проводя различные опыты на вертикальном роторном пленочном аппарате с жесткими скребками, Марченко получил критериальные зависимости, которые можно использовать для определения мощности привода.

$$K_N = A \cdot Re_{nl}^a \cdot Re_{nl}^b \cdot Fr_{\eta}^c \cdot \left(\frac{Z}{3}\right)^d,$$

где величины  $A, a, b, c, d$  были найдены экспериментальным путем.

В качестве модельных жидкостей использовались вода и минеральное масло. Число лопаток на роторе менялось от 3 до 8. Результаты эксперимента были обработаны в виде критериального уравнения.

Вопрос о мощности, потребляемой в пленочных роторных аппаратах при перемешивании особо вязких жидкостей, изучался Мютценбергом. Отмечено, что расход мощности может достигать очень высокой величины на единицу объема обрабатываемой жидкости. Однако мощность привода не превышает

1 кВт на квадратный метр теплообменной поверхности.

Авдоськин проанализировал сложный процесс перемешивания жидкости в пленочном роторном аппарате с жесткими лопатками на основании математического описания следующей упрощенной модели.

На каждую лопатку при вращении ротора действуют три силы, направленные перпендикулярно плоскости лопатки.

Сила инерции, возникающая за счёт сообщения вновь поступающей жидкости вращательного движения.

Касательное усилие в зазоре.

Сила нормального давления жидкостного валика.

Из литературных данных можно считать установленным, что мощность, затрачиваемая на перемещение жидкостной пленки в пленочных роторных аппаратах, зависит от скорости вращения ротора, плотности орошения, вязкости жидкости, диаметра аппарата, числа лопаток ротора, величины зазора между лопаткой и стенкой, от типа роторного устройства.

### **Теплообмен**

В пленочных роторных аппаратах, где толщина пленки задается плотностью орошения, скоростью вращения ротора, зазором между лопаткой и греющей поверхностью, можно получить пленку практически любой толщины (от десятых долей миллиметра до 5 мм) и, как следствие, высокие коэффициенты теплоотдачи.

При рассмотрении теплообмена в тонкой пленке необходимо учитывать следующие критические параметры, которые характеризуют этот процесс.

Критическая толщина пленки -  $\delta_{кр}$

Критическая плотность теплового потока -  $q_{кр}$

Критический температурный напор -  $\Delta t_{кр}$

Кутателадзе предложил следующую теорию кипения. Он считает, что тепло передается жидкости, а от жидкости – к паровым пузырям, рост и движение которых способствует передаче тепла жидкости, турбулизируя пограничный слой. Из этой теории следует, что с увеличением вязкости жидкости ухудшается турбулизация пограничного слоя, а, следовательно, уменьшается и коэффициент теплопередачи.

В пленочных аппаратах, где за счёт увеличения оборотов ротора можно турбулизировать пленку в той мере, в какой нам необходимо, можно перерабатывать очень вязкие жидкости без ухудшения коэффициента теплопередачи.

Одним из важных факторов является фактор турбулизации. Высокий фактор турбулизации пленки можно достичь в пленочных аппаратах с вращающимся ротором. Сравнивая характеристики различных роторных аппаратов, Бресслер показал, что при уменьшении температурного напора самыми эффективными становятся пленочные роторные аппараты с шарнирными лопатками, которые создают наиболее тонкую пленку и обеспечивают наилучшую теплопередачу.

Часть исследователей считает, что оптимальным режимом является режим, при котором остается 25-30% жидкости неиспаренной.

При изучении зависимости изменения коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи от увеличения числа оборотов ротора было установлено, что влияние окружной скорости ротора на интенсивность теплообмена находится в некоторой пропорциональной зависимости для пленочных роторных аппаратов с жесткими лопатками до 11 м/с, а для аппаратов с шарнирными лопатками до 3 м/с.

При больших числах оборотов ротора влияние окружной скорости на теплообмен не заметно.

Изучая влияние вязкости на интенсивность теплообмена Донован установил, что с увеличением вязкости до  $10^5$  сП интенсивность теплообмена не ухудшается. Лишь при увеличении вязкости более  $10^5$  сП начинают уменьшаться коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи. Возможность переработки высоковязких растворов в пленочных роторных аппаратах очень перспективна.

Так как процесс теплоотдачи в пленочном роторном аппарате протекает очень интенсивно даже при получении пластов, Р.Шнайдер высказал предположение о возможности получения в роторных аппаратах сухого продукта.

Дитер отметил, что на стенках происходит отложение тонкого слоя поваренной соли, не имеющего пор, и процесс передачи тепла в данном случае происходит теплопроводностью.

## **Задачи исследования и предварительные известные сведения по экспериментам**

На основе литературных источников и отчетов проведенных экспериментов составлена общая модель проведения экспериментов в роторном пленочном аппарате на опытной экспериментальной установке, предназначенной для изучения гидродинамики и теплообмена в перемешиваемой тонкой пленке применительно к процессу концентрирования. Планируется проведение пассивных экспериментов для определения влияния каждого из нижеследующих факторов в отдельности. Затем активных экспериментов, которые будут учитывать влияние производительности аппарата, коэффициента теплопередачи, затрачиваемой мощности, теплового потока, линейной скорости вращения ротора, плотности орошения, разрежения в аппарате, концентрации и температуры исходного раствора. В задаче составить зависимости производительности аппарата от числа оборотов ротора по результатам опытов в оптимальном режиме в течение 4 часов.

В опытах будет принято к сведению уже известные некоторые экспериментальные сведения о незначительном влиянии разрежения, температуры исходной жидкости на производительность. Однако влияющими факторами являются давление греющего пара, скорость вращающегося ротора. При проведении опытов по испарению растворов, частоту вращения ротора планируется принимать средней в 150 об/мин, температура исходного раствора брать как температуру её хранения, разрежение оставлять стабильным.

Определен общий состав нескольких типов модельных растворов. Полученные зависимости должны соответствовать средним значениям по всей высоте аппарата. В дальнейшем необходимо найти значения параметров для каждой зоны в отдельности, что будет более реально отображать существующую картину гидродинамики и теплопередачи. На основе экспериментов составляются уравнения без факторов, которые не оказывают влияние на процесс. А также точность определения по каждому из уравнений.